第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

巴丹吉林沙漠晚更新世沉积物矿物学特征及其指示意义

张新毅[1]， 范小露[1]， 田明中[2]

（1. 阜阳师范大学历史文化与旅游学院地理系，安徽 阜阳 236037；
2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083）

摘 要：巴丹吉林沙漠是研究亚洲内陆干旱化等古环境问题的重要窗口。以沙漠东南缘巴润宝日陶勒盖剖面为研究对象，通过详细的薄片矿物学、X射线衍射半定量及粒度等方法指标，综合分析沉积物的结构成熟度和成分成熟度等矿物学特征，恢复该地区在晚更新世沉积环境变化。结果表明：（1）66.8 ka之前沉积的矿物碎屑分选性好、磨圆较好，稳定矿物含量高；66.8 ka之后，矿物分选性差、磨圆差，稳定矿物含量均下降，粘土矿物增加。（2）66.8 ka之前沉积物以中砂为主，66.8 ka之后以细砂为主。研究表明巴丹吉林沙漠东南缘66.8 ka前后存在一次沉积环境突变，由风沙沉积转变为湖相沉积，可能代表了一次典型的东亚夏季风增强事件，推测与低纬西太平洋温度升高相关。对于巴丹吉林沙漠东南缘沉积物矿物学的相关认知有助于理解沙漠中沉积环境的转换过程及其驱动因子，并为重建沙漠千年尺度的古环境与古气候演变提供数据参考。

关 键 词：晚更新世；矿物特征；沉积环境；巴丹吉林沙漠

文章编号：1000－6060(2022)06－1773－11(1773～1783)

巴丹吉林沙漠作为阿拉善沙漠的主体，南起青藏高原东北缘，北邻蒙古戈壁，深入我国西北内陆干旱区腹地，是研究亚洲内陆干旱化等古环境热点问题的典型区域。同时，作为东亚季风环流与西风环流的过渡区域，是响应气候变化的敏感场所，借助高分辨率沉积剖面重建第四纪以来古环境可深入挖掘干旱区气候变化特征及其驱动机制[1-2]。以巴丹吉林沙漠为研究对象，目前诸多学者的研究主要着眼于沙山[3-7]、砂楔[8]、盐湖[9-10]、洪泛沉积物[11]、表层风沙[12-13]、钙华[14]等方面，以此为基础进行古环境演化、古气候变迁、古风向、沙漠物源、地下水补给等问题的探讨。沉积剖面作为响应古环境与古气候变化的真实记录，是第四纪地质研究的绝佳对象与直观窗口，巴丹吉林沙漠以查格勒布鲁剖面研究最为深入。基于主量元素、微量元素、粒度等高分辨率指标，结合^{14}C等建立的年代框架，研究发现查格勒布鲁剖面记录了中更新世以来巴丹吉林沙漠经历了25个干寒与暖湿旋回[15]。晚更新世期间巴丹吉林沙漠干湿环境取决于东亚夏季风盛衰变化，西风环流所携带水汽无法抵达沙漠所在区域[16]，全新世巴丹吉林沙漠干湿气候变化受北半球太阳辐射持续减弱影响[17]，反映了千年尺度的气候波动与东亚季风环流波动的藕合关系[18]。已有的沉积记录或湖泊岩芯研究多偏重全新世以来的气候变化过程，而对晚更新世的研究相对较少。本文在前人研究的基础上，对另一代表性剖面——巴润宝日陶勒盖（BRBG）剖面进行深入的挖掘，团队前期研究已建立该剖面的年代框架[19]和地球化学指标[20]，本研究将通过薄片矿物学、X射线衍射（XRD）半定量、粒度测定等方法，深入挖掘巴丹吉林沙漠晚更新世沉积物的矿物学特征，如磨圆度、分选性、成分、粒径等，在此基础上结合矿物结构成熟度和成

收稿日期：2022-02-12； **修订日期**：2022-04-21

基金项目：安徽省哲学社会科学规划项目（AHSKQ2021D213）；安徽省高校科学研究项目重点项目（SK2020A0311，SK2021A0416）；阜阳师范大学青年人才基金重点项目（rcxm201907）资助

作者简介：张新毅（1989-），男，硕士，工程师，主要从事沉积学及灾害地质学研究. E-mail: xinyiz0117@163.com

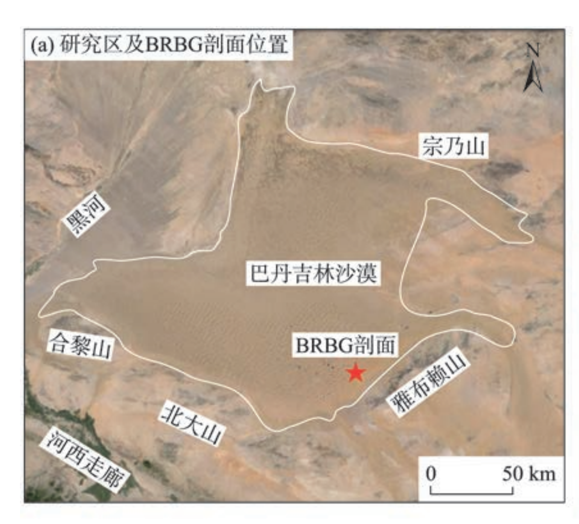
通讯作者：范小露（1987-），女，博士，副教授，硕导，主要从事第四纪气候演化与气象灾害研究. E-mail: atsunnyshore@126.com

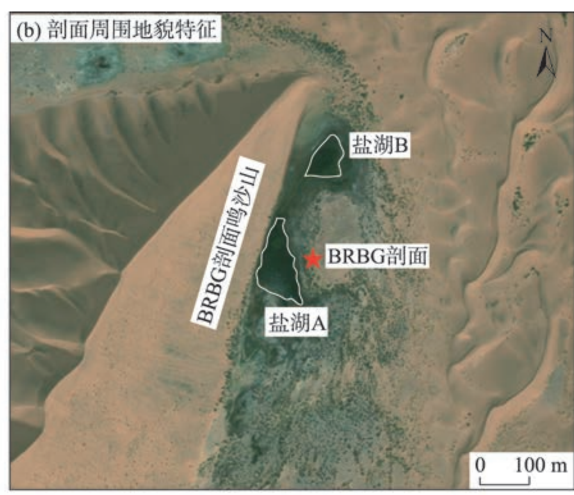
分成熟度探究沉积环境变化与环境响应机制。

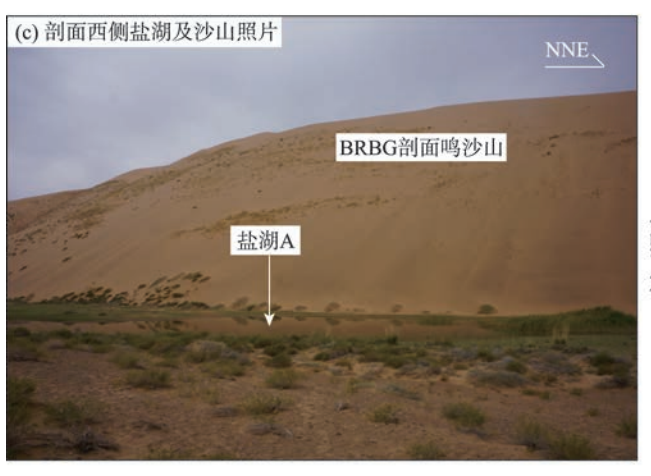
1 研究区及剖面概况

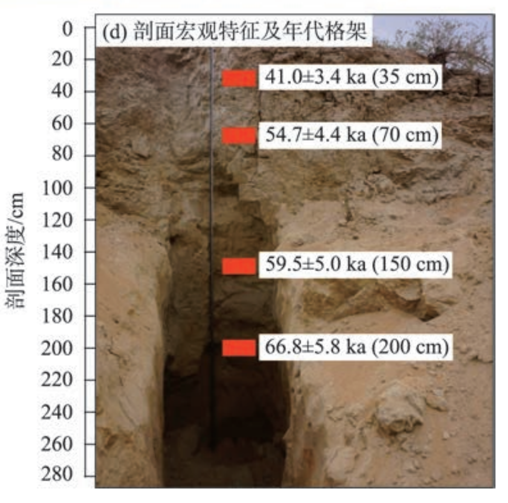
巴丹吉林沙漠位于阿拉善高原腹地，东北的宗乃山、东南的雅布赖山、西南的北大山和合黎山从3个方向形成围拢之势，造就了巴丹吉林沙漠独有的簸箕形地貌特征，而西北的黑河流域冲积扇则成为沙漠的主要物源区。研究区行政区属内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善右旗，地势总体呈南高北低、西高东低，西南与东南分别被北大山与雅布赖山围拢，平均海拔900~2200 m，为典型的温带大陆性季风气候。降雨主要集中于酷热夏季，冬季寒冷干燥，年均气温8.4 ℃，1、7月平均气温分别为-8.6 ℃和23.7 ℃，日照充足，蒸发量大。BRBG剖面位于巴丹吉林沙漠东南缘(39°36′04″N，102°28′38″E；剖面台地地表海拔1294 m)（图1a），西邻BRBG剖面鸣沙山，紧挨一浅水位现代沙漠盐湖（湖面海拔约1275 m），剖面位于台地露头边缘，地表有植被发育（图1b~c）。

根据野外露头宏观颜色及粒度等特征，剖面可分为3层：上层(0~35 cm)含有大量钙质根管，为一套棕黄色砂土沉积，细砂为主，含少量粉砂与黏土；中层(35~200 cm)为中细砂，呈绿灰色，含水丰富，故而压实作用明显，钙质根管含量锐减；下层(200~280 cm)为灰红色粗粒砂层，与附近高大沙山迎风面沙粒特征大致相当[20]。前期研究在剖面35 cm、70 cm、150 cm和200 cm共取4个光释光(OSL)样品，测年结果分别为(41.0±3.4)ka、(54.7±4.4) ka、(59.5±5.0) ka和(66.8±5.8) ka[19]（图1d），本文在此年代框架基础上开展深入的矿物学特征研究。矿物学研









注：BRBG表示巴润宝日陶勒盖。下同。

图1 研究区及剖面概况

Fig. 1 General characteristics of the study area and section

究主要采用薄片观察、XRD半定量及粒度分析等方法。野外采集薄片样共18件：上层3件，每件间隔10 cm；中层10件，每件间隔20~30 cm；下层5件，每件间隔20~25 cm。因35 cm和200 cm指示明显的分层特征，故而在35 cm上下5 cm处各取样一次，200 cm处取样外，在190 cm加样1个，以确保结果的精确与可靠。XRD采样平均间隔为15 cm，其中35 cm界线上下间隔分别为5 cm和10 cm，200 cm界线上下20 cm内均以10 cm为间隔取样，共采集样品22个。粒度样为每间隔5 cm取一次样，共取样56个。

2 研究方法

通过薄片观察可获得沉积物内矿物种类、含量、尺寸、分选、磨圆等基本信息[21]。风干样品利用树胶凝结切片，在中国地质大学（北京）磨片室制成偏光薄片，而后在XRD扫描分析实验室利用偏光显微镜对沉积物薄片进行观察，对照各矿物的晶体光学特征进行矿物鉴定，并对各个样品中代表性矿物进行拍照，共完成18件薄片的镜下观察。

矿物定量分析采用XRD粉晶衍射，H_2O_2溶解样品中有机质，风干后样品粉碎至350目，在中国地质大学（北京）粉晶衍射实验室粘靶测试，所用测试仪器为SmartLab型X射线粉晶衍射仪，测试误差小于2%。所用靶为Cu靶，测试电压45 kV，电流200 mA，室温25 ℃，湿度56%。共测试样品22个，详细原理、方法及测试流程见黄继武等[22]研究。

沉积物粒度实验完成于中国地质大学（北京）粒度分析实验室，所用仪器为Mastersizer 2000型激光粒度分析仪，测量精度优于2%，可测粒度范围为0.03~2000 μm。实验共完成56个样品的粒度测试分析，样品前处理依据Zhao等[23]的处理方法，根据粒度粗细适量取样，添加分散剂并经超声震荡分散样品，加入H_2O_2去除有机质，冷却加入稀盐酸去除碳酸盐，蒸馏水稀释去除上清液至溶液呈中性，取悬浊液上机测试。

3 结果与分析

3.1 显微镜下矿物特征

第四纪沉积物由于总体颗粒较细，肉眼直接观察仅可以识别沉积层位的色度、相对含水量及有无植物根管等宏观特征，不足以了解各层沉积物的微观具体特征，通过将松散沉积物制成薄片借助显微镜观察的方法可以更加直观地将矿物自身特征呈现出来，如矿物分选性、磨圆度、稳定矿物百分比等。BRBG剖面晚更新世沉积物镜下特征显示，在剖面200 cm处沉积物矿物特征存在明显突变（图2）。就分选性而言，0~200 cm剖面碎屑矿物粗细大小混杂，分选性差，指示搬运动力较弱；200~280 cm碎屑矿物大小趋于均匀，分选性好，指示搬运动力条件较强。沉积物磨圆度显示，0~200 cm碎屑矿物多为棱角状-次棱角状，磨圆度差，指示搬运距离近，为近物源供给；200~280 cm碎屑矿物颗粒多呈次棱角至次圆状，个别呈圆状，如255 cm沉积物薄片视野中出现圆度极高矿物，磨圆度较好，指示为远距离搬运，物源供给区距离沉积地较远。矿物种类及含量特征显示，0~200 cm除大颗粒碎屑矿物外，在碎屑矿物之间散布一定含量的粒径细小的粘土矿物，致使该层位矿物呈现混杂状态；200~280 cm多为石英、钾长石、斜长石等大颗粒稳定矿物，颗粒细小的粘土矿物含量大幅减少，总体呈现矿物颗粒边界及表面形态清晰、含量稳定等特征（图2）。总体而言，剖面200 cm以下矿物成分成熟度较高，结构成熟度亦较高，但200 cm以上则显示出相反的矿物学特征，指示在剖面200 cm处，即66.8 ka前后，剖面所在位置沉积环境发生了变化。

3.2 XRD矿物定量分析

通过XRD分析可以获得沉积物的矿物半定量信息，识别出主要矿物的种类及含量。诸多矿物的种类与含量可以直观反映其所处环境信息，如长英质矿物、粘土矿物等。BRBG剖面XRD分析结果如下：

长英质矿物（如石英、钾长石、斜长石等）稳定性相对较强，其含量多少在一定程度上可反映沉积物被搬运至沉积环境过程中所经历的距离和搬运营力的类型。剖面从底到顶长英质矿物均为主要矿物，但各层含量不尽相同。200~280 cm长英质矿物含量为95%~100%；35~200 cm长英质矿物含量为85%~97%；0~35 cm长英质矿物含量为65%~85%（图3）。可见，在200 cm以下长英质矿物占据绝对主导含量，与风力搬运的风沙沉积矿物组成特征一致。

沉积物中粘土矿物含量与种类能很好地反映风化作用类型与环境演变背景，是气候变化的敏感

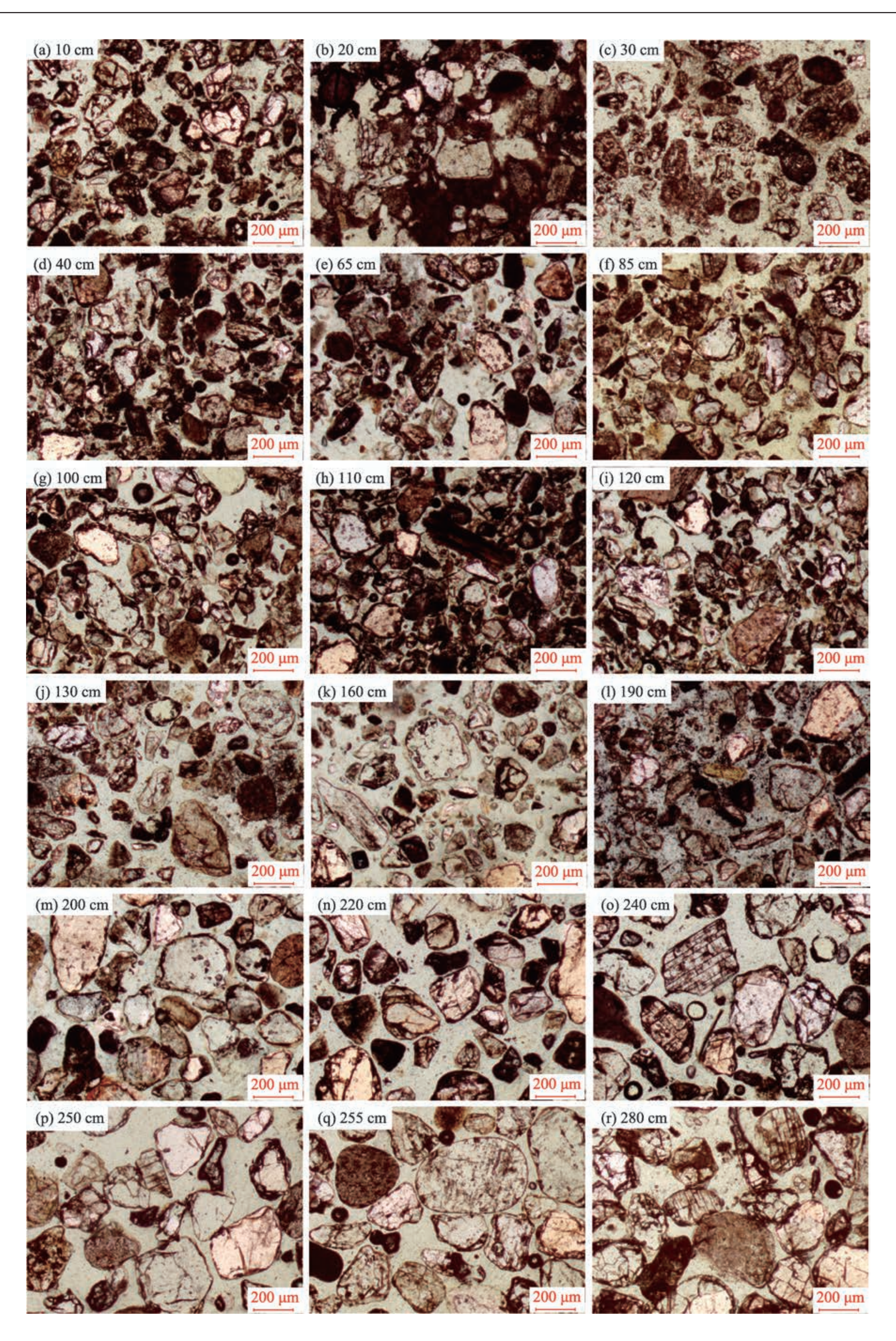


图2 BRBG剖面(10~280 cm)沉积物显微镜下特征

Fig. 2 Sediment feature of BRBG section (10−280 cm) under the microscope

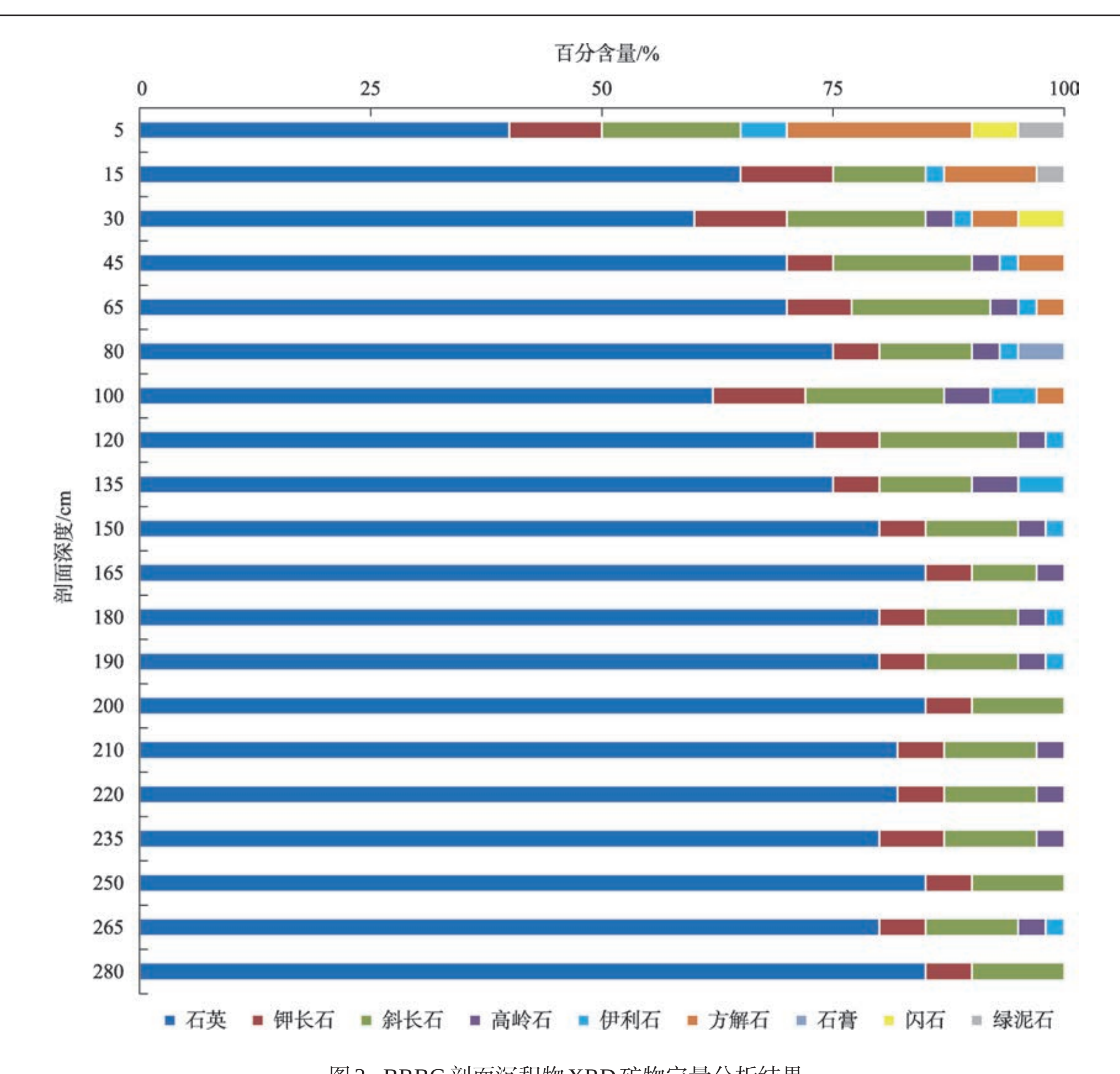


图3 BRBG剖面沉积物XRD矿物定量分析结果

Fig. 3 XRD analysis results of BRBG section sediments

指标。伊利石由长石、云母等铝硅酸盐矿物风化脱钾而成，在温暖湿润条件下，伊利石可以继续脱钾形成蒙脱石，最终转化为高岭石[24]。因此，寒冷干旱的气候条件更利于伊利石的保存。高岭石在粘土矿物中含量一般较少，但其含量增加能准确地反映环境条件向温暖湿润方向转变[25]。剖面200 cm以下粘土矿物含量较少，出现多为高岭石，含量在3%~5%之间，仅在265 cm处出现伊利石与高岭石共生组合；0~200 cm大量存在伊利石与高岭石共生现象，且粘土矿物含量增加，含量3%~10%，多数层位含量在5%左右，100 cm和135 cm处含量最高(10%)(图3)，表明环境相对温暖湿润。

伴随湖泊卤水矿化度的提高，不同类型的碳酸盐矿物和蒸发岩矿物会逐渐析出，其顺序一般为碳酸盐矿物(如方解石)、硫酸盐矿物(如石膏、芒硝)、氯化物矿物(如石盐)[26]，该矿物析出顺序在一定程度上指向湖泊蒸发作用增强和湖水盐度升高。剖面XRD结果显示在100 cm以上出现方解石，且由下向上方解石含量呈增加趋势，从100 cm处的3%增加至5 cm处的20%，指示湖泊水体朝着咸化方向发展。此外，80 cm处出现了蒸发岩矿物石膏，但80 cm上下并无石膏析出，指示湖水咸化程度达到了一个极大值点。

3.3 沉积物粒度特征

沉积物粒度组成是反映沉积物环境的重要参考指标，比如依据风成沉积物粒度特征可判断区域风力强弱变化、气候湿度变化、沉积环境等信息[27-28]，湖泊沉积物粒度可反映水动力强弱、降水多少、湖泊水位高低、湖水盐度等信息[29-30]。基于统计分析，BRBG剖面沉积物各层段各粒级成分含量变化见图

4。剖面中上层(35~200 cm为中层,0~35 cm为上层)以细砂为主,平均含量分别为56.32%和61.51%,而下层则以中砂为主,平均含量为65.33%,剖面自下而上呈现颗粒变细的趋势。粗砂在下层(200~280 cm)含量较高,平均值达14.43%,向上骤然降低,中上层的平均含量分别为2.82%和0.15%。粉砂含量呈现与粗砂截然相反的特征,下层含量极低(平均值为0.07%),而中上层含量则较高,分别为8.03%和6.03%。与粉砂含量特征相似,下层不含黏土,中上层黏土平均含量分别为0.73%和0.02%,相对而言中层黏土含量最高。在各粒级含量比重方面:中层与上层依次为细砂>中砂>粉砂>粗砂>黏土;下层与中上层差异性较大,依次为中砂>细砂>粗砂>粉砂>黏土。此外,来自剖面附近的沙山鸣沙参照样的粒度组成特征与BRBG剖面下层相似,以中砂为主要组分。

粒度频率曲线可直观展示样品的粒度分布特征。BRBG剖面上层沉积物频率曲线呈微正偏态,偏态系数为0.07~0.33,峰值集中于200 μm附近,属细砂范围,峰值细砂含量7.94%~10.68%(图5a);中层同上层相似,亦呈微正偏态,偏态系数居于0.08和0.49之间,峰值粒径为200~252 μm,属细砂中粗粒径范畴,峰值对应含量为7.51%~10.86%(图5b);下层呈对称分布,峰值为317~356 μm,对应中砂粒径,峰值对应含量9.45%~15.68%(图5c)。总体而言,各层沉积物均呈单峰态,指示各层沉积物源稳定,但下层与中上层间存在明显的物源变化。此外,参照样沙山鸣沙峰值粒径317 μm,可见下层沉积物与沙山鸣沙呈相似的频率分布特征(图5d)。

数学统计中的数据标准离差对应粒度的分选系数,此系数是标定沉积物粒度集中度的重要参数,分选系数越小指示沉积物分选性越好,BRBG剖面沉积物分选性特征如下:上层分选系数(σ)介于0.55~1.03之间,属较好($0.50\leq\sigma<0.71$)、中等($0.71\leq\sigma<1.00$)和差($1.00\leq\sigma<2.00$)3个等级范畴;中层分选性与上层相仿;下层分选系数为0.40~0.67,分选性分级为好($0.35\leq\sigma<0.50$)和较好($0.50\leq\sigma<0.71$)。可见,以200 cm分界线,下层与中上层所反映的沉

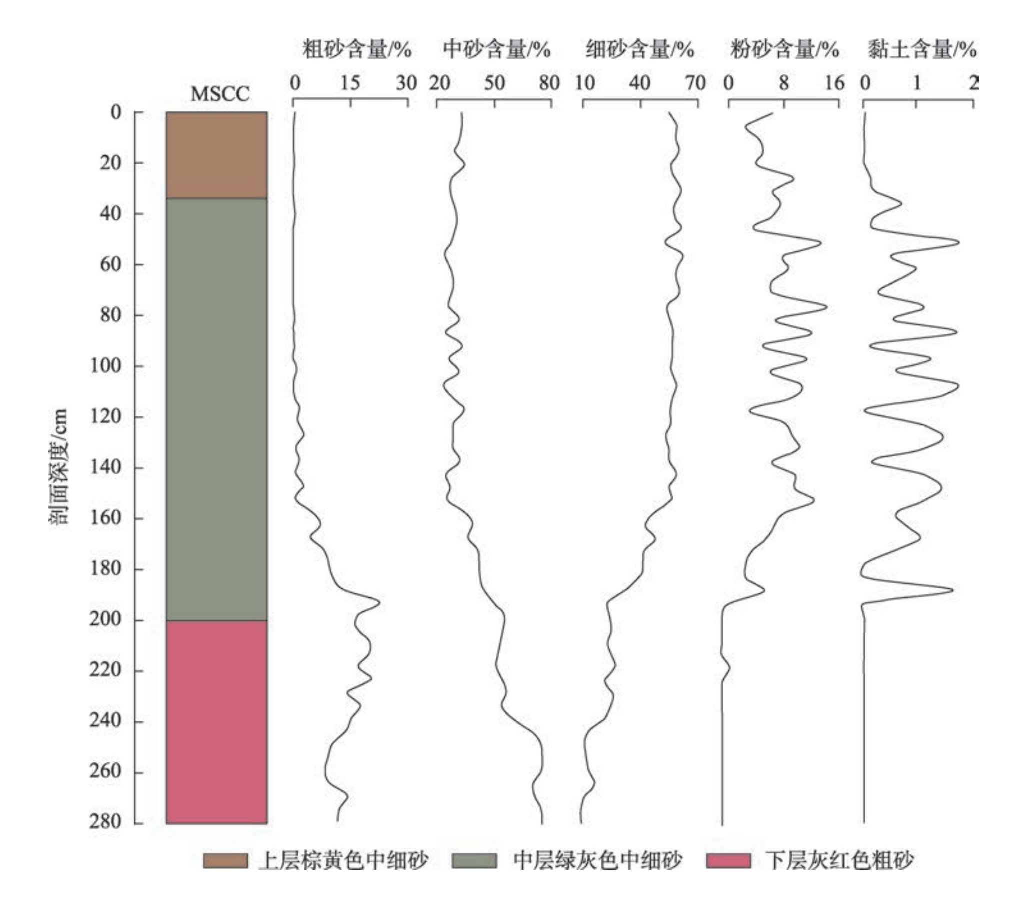
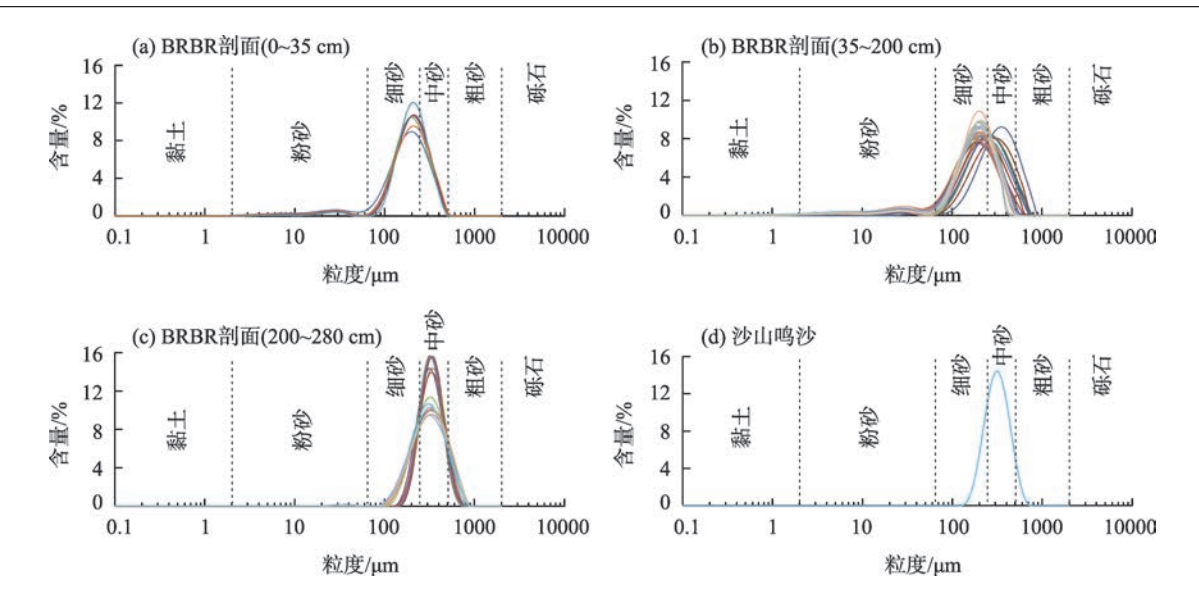


图4 BRBG剖面蒙赛尔色卡比对(MSCC)与各典型组分对比关系

Fig. 4 MSCC and typical components content of BRBG section



注：剖面上中下层每间隔5 cm采集粒度样品1次。

图5 BRBG剖面沉积物粒度频率曲线

Fig. 5 Grain size frequency curve of BRBG section sediments

积环境存在较大差异。

4 讨论

不同沉积环境在沉积物粒度频率曲线及峰值大小表现出明显的差异性，利用将今论古原则，对比现代沉积环境中沉积物特征是分析推断剖面不同层段沉积环境的有效方法[31]。以黑河和石羊河为代表的河流沉积物呈双峰式，峰值粒径范围分别为5~10 μm和80~400 μm[32]；以巴丹吉林沙漠和科尔沁沙地为代表的风沙沉积为单峰模式，分选好，峰值粒径为200~300 μm[33]；湖泊沉积物空间变化差异大，类型复杂，特点为分选性差[34]。BRBG剖面沉积物粒度频率曲线各段均为单峰模式，指示了单一的物源供给特征，但整个剖面呈现明显的2段式特征，即200 cm上下沉积物特征存在明显变化。200~280 cm粒度较粗，以中砂为主，分选性好，不含黏土，峰值粒径为317~356 μm，与风沙沉积的峰值粒径相近。此外，下层沉积物与就近所采沙山鸣沙的峰值粒径(317 μm)一致，共同指示了下层(200~280 cm)，即BRBG剖面所处位置在66.8 ka之前为风沙沉积环境。0~200 cm以细砂为主，峰值粒径从200 cm向上有逐渐变小的趋势，从252 μm逐步减小至200 μm，磨圆度差，分选性差，高岭石、伊利石等粘土矿物增多，故而推断中上层为湖相沉积，即66.8 ka之后在风沙层之上发育沙漠湖泊。此外，BRBG剖面前期研究成果显示剖面200 cm以下呈现粗粒度、低黏土含量、高磁化率等特征，同样指示了风沙沉积环境[19]。200 cm以上呈现细粒沉积物残留组分高Sr/Ca值，酸溶组分及残留组分低Ba含量，指示了温暖湿润的湖泊沉积环境，化学风化增强[20]。

根据瓦尔特相律，只有横向上成因相近且紧密相邻发育着的沉积相，方可原生地在纵向上依次叠置。BRBG剖面所在位置为巴丹吉林沙漠东南缘，临近雅布赖山，但已是深入沙漠腹地，不存在冲洪积沉积，故而主要有两种沉积类型：风沙沉积和盐湖沉积。BRBG剖面200 cm以下为风沙沉积，200 cm以上至地表为湖相沉积，这种沉积相的变化指示原本风沙沉积基底之上发育了湖泊。结合现代沙丘发育演化特征，BRBG剖面沉积相的变化可能有两种主要成因：(1) 沙山移动，即沙漠地区的活动沙山可以在风力的作用之下发生位置的迁移，受风力作用侵蚀与搬运作用，沙山位置会发生变化，从而导致与之伴生的沙山间湖泊面积发生变化[35]，这种沉积环境的变化主要与区域主导风向及沙山-湖泊相对位置等因素相关。(2) 盐湖水位上涨，即由于气候变化等因素导致区域水量补给大幅增加，原本的盐湖因为水量增加，湖泊面积扩大，水位升高，原本非湖泊区域被湖泊覆盖，后续沉积一套湖相沉积层[36]。沙山迁移主要受控于风力侵蚀与搬运，迎风坡中下

部沉积物被剥蚀向沙山上部搬运，沙山在纵向上生长的同时其背风坡不断接受重力作用堆积，最终导致沙山沿着区域主风向迁移。BRBG剖面所在区域自晚更新世开始地表盛行风为西北风[7]，现代风场观测结果亦支持该结论[37]。BRBG剖面位于BRBG剖面鸣沙山东南(图1b)，与盐湖共同位于沙山的背风坡一侧，且盐湖位于沙山与沉积剖面之间(图1c)，若遵循沙山迁移理论，BRBG剖面鸣沙山应向东南方向迁移，即朝盐湖和剖面方向迁移。虽不排除现今地貌格局已是沙山迁移后的结果，即BRBG剖面鸣沙山向东南方向迁移，导致原盐湖面积发生了变化，但无法解释剖面湖相沉积层与现今盐湖的相对位置关系。从野外宏观地貌格局(图1b)和地貌单元的相对位置关系来看，剖面与沙山之间2个盐湖应是地质历史时期某个大湖的2个残留单元，相对于现今盐湖湖面高出十余米的剖面所在台地据推测应是一个湖心岛。换言之，BRBG剖面上部2 m厚的湖相沉积层更可能是地质历史时期盐湖水位上涨所致，是区域气候变化的结果。

晚更新世巴丹吉林沙漠地区主要受东亚季风环流影响，风沙活动占据主导[7]。换言之，若东亚夏季风增强，影响范围扩大，其西部边缘区可越过黄土高原抵达巴丹吉林沙漠，深入西部干旱区，给沙漠带来降水，湖泊发育，沙漠界线北退；反之，东亚夏季风影响区域大幅缩减，水汽无法传输至巴丹吉林沙漠地带，盐湖干涸，沙漠界线南进。BRBG剖面东北的查格勒布鲁剖面记录在75~10 ka间存在14个沙漠与湖相旋回[38]，如此高频度的干湿变化恰恰是东亚季风系统(尤其是东亚夏季风)在千年尺度上波动的直观反映。BRBG剖面所记录的沉积区在66.8 ka前后由沙漠向湖相转变，应属其中一次较为典型的东亚夏季风增强的体现，季风增强幅度在末次冰期应属最强序列，在沉积区发育大型湖泊，湖泊水位在66.8 ka后从低洼区淹没200 cm处分界线后仍持续上升。从野外宏观地貌特征和测量数据来看，BRBG剖面西侧2个盐湖湖面海拔约1275 m，剖面顶部台地海拔1294 m，该时期水位上升至少19 m左右，湖相台地乃是下伏沙丘被大湖淹没后逐渐沉积所致。值得注意的一点是，剖面从200 cm处开始发育沙漠湖泊，但在湖泊发育初期(剖面200~180 cm)呈现粗砂、粉沙和黏土沉积同时快速增加，然后粗砂沉积逐步减少，粉沙和黏土比例继续逐步增加的趋势；同时该段粗砂呈现与下层粗粒沉积物不同的特征，磨圆度大幅降低，结合BRBG剖面接近雅布赖山麓冲积扇(约10 km)这一特殊的地理位置，推测湖泊形成早期可能接受了雅布赖山区降水形成的洪水补给，造成剖面粗砂形态发生突变。

东亚季风系统作为高低纬度间能量和水分传输的重要纽带已成为气候变化研究的重要对象，全球温度背景是东亚夏季风变化的首要控制因素[39]。末次冰期西北干旱区气候呈现出的不稳定性，指示了东亚夏季风的强弱波动，亦间接反映了低纬西太平洋温度升降变化。从地球轨道尺度层面来讲，相对于末次间冰期，末次冰期早期北半球高纬度地区夏季太阳辐射由强渐弱[40]，继续促进入北大西洋的海冰减少，北大西洋底层流温度增加，北半球高纬度温度信号可通过北大西洋底层温盐环流传输至低纬太平洋进而影响东亚夏季风[41]。与此同时，现代气象观测发现北极海冰增加对东亚冬季风增强存在增幅作用[42]，北极海冰减少对应东亚冬季风增幅下降，东亚冬季风减弱，则无力阻止夏季风北上，同时低纬西太平洋受东亚冬季风减弱影响的反馈为温度升高，促使洋面蒸腾作用增强和夏季风持续时间延长，结果为促使东亚夏季风增强。

5 结 论

(1) BRBG剖面66.8 ka前后矿物学特征发生突变，具体表现为：66.8 ka之前以磨圆度、分选性、稳定性较好的中砂为主；而66.8 ka之后为磨圆度较差、分选性一般的细砂为主，粘土矿物含量增多。

(2) BRBG剖面所处位置在66.8 ka之前为风沙沉积环境，66.8 ka之后在风沙层之上发育沙漠湖泊。

(3) 66.8 ka之后巴丹吉林林沙漠东南缘发育沙漠湖泊可能为该时期东亚夏季风显著增强所致，与低纬西太平洋温度升高相关。

参考文献(References)

[1] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid Central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(3-4): 351-364.

[2] Chen J H, Chen F H, Feng S, et al. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the medieval climate anomaly and lit-

tle ice age: Spatial patterns and possible mechanisms[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 107: 98-111.

[3] 肖南, 董治宝, 刘铮瑶, 等. 巴丹吉林沙漠及其高大沙山研究评述[J]. 地理研究, 2021, 40(7): 1887-1901. [Xiao Nan, Dong Zhibao, Liu Zhengyao, et al. A review of the Badain Jaran Sand Sea and its megadune[J]. Geographical Research, 2021, 40(7): 1887-1901.]

[4] 陈天源. 基于光释光年代学的巴丹吉林沙漠高大沙山-湖泊环境形成及演化研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2019. [Chen Tianyuan. Study on the formation and evolution of the megadune-lake environment in Badain Jaran Desert based on lumineecence chronology[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2019.]

[5] 崔徐甲, 孙虎, 董治宝, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物地球化学元素组成及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 17-25. [Cui Xujia, Sun Hu, Dong Zhibao, et al. Geochemical elements compositon of sediments for megadunes and its environment significance in the Badain Jaran Sand Sea[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 17-25.]

[6] Liu S W, Lai Z P, Wang Y X, et al. Growing pattern of mega-dunes in the Badain Jaran Desert in China revealed by luminescence ages[J]. Quaternary International, 2016, 410: 111-118.

[7] 闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠更新世古风向变化及环境意义[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 118-122. [Yan Mancun, Wang Guangqian, Li Baosheng, et al. Pleistocene paleowind direction change in the Badain Jaran Desert and its environmental significance[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology Edition), 2001, 41(11): 118-122.]

[8] 余莺潇, 王乃昂, 隆浩, 等. 巴丹吉林沙漠东南缘砂楔年代及其环境意义[J]. 科学通报, 2017, 62(30): 3461-3469. [Yu Yingxiao, Wang Nai'ang, Long Hao, et al. The age of sand wedges and its environmental significance at the southeast edge of Badain Jaran Desert[J]. Chinese Science Billetin, 2017, 62(30): 3461-3469.]

[9] 伏梦璇, 于世永, 吴金甲, 等. 巴丹吉林沙漠南缘高台盐湖记录的中晚全新世气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(4): 192-203. [Fu Mengxuan, Yu Shiyong, Wu Jinjia, et al. Mid-to-late Holocene climate changes on the southern margin of the Badain Jaran Desert: Evidence from the Gaotai Lake sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(4): 192-203.]

[10] 李卓仑, 马素辉, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠盐湖面积变化对湖泊边缘表层沉积物盐类矿物组合影响[J]. 盐湖研究, 2015, 23(4): 8-14. [Li Zhuolun, Ma Suhui, Wang Nai'ang, et al. Impacts of salt lakes area changes in Badain Jaran Desert on saline minerals assemblages[J]. Journal of Salt Lake Research, 2015, 23(4): 8-14.]

[11] 姜高磊, 聂振龙, 刘哲, 等. 巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物的光释光年代及其水文学意义[J]. 地球科学, 2021, 46(5): 1829-1839. [Jiang Gaolei, Nie Zhenlong, Liu Zhe, et al. OSL ages and its hydrological implications of alluvial-diluvial deposits from the southern margin of Badain Jaran Desert[J]. Earth Science, 2021, 46(5): 1829-1839.]

[12] 刘铮瑶, 董治宝, 萨日娜, 等. 巴丹吉林沙漠边缘沉积物粒度和微形态特征空间分异[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 945-953. [Liu Zhengyao, Dong Zhibao, Sa Rina, et al. Grain size and micro-morphology characteristics of the surface sediments in the marginal area of the Badan Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 945-953.]

[13] 付旭东. 巴丹吉林沙漠石英$\delta^{18}O$值及其物源意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 67-74. [Fu Xudong. Characteristics of oxygen isotopic compositions of quartz in the Badain Jaran Desert and its implications for sand provenances[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(1): 67-74.]

[14] 曹乐, 刘敏. 巴丹吉林沙漠车日格勒钙华测年及其地质意义[J]. 科技风, 2017(7): 151-152. [Cao Le, Liu Min. Dating of Cherigele travertine in Badain Jaran Desert and its geological significance [J]. Technology Wind, 2017(7): 151-152.]

[15] 杨艺, 李保生, 李云卓, 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布剖面微量元素反映的150 ka BP以来的气候变化[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 1-8. [Yang Yi, Li Baosheng, Li Yunzhuo, et al. Palaeo-climate change indicated from fluctuations of trace elements since 150 ka BP in Chagelebu stratigraphical section, Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(1): 1-8.]

[16] 高全洲, 陶贞, 董光荣. 微量元素记录的化学风化和气候变化——以巴丹吉林沙漠查格勒布鲁剖面为例[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 59-64. [Gao Quanzhou, Tao Zhen, Dong Guangrong. Chemical weathering and climatic changes recorded by the trace elements in Chagelebulu section, Badain Jaran Desert, China[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 59-64.]

[17] 刘子亭, 杨小平, 朱秉启. 巴丹吉林沙漠全新世环境记录的年代校正与古气候重建[J]. 第四纪研究, 2010, 30(5): 925-933. [Liu Ziting, Yang Xiaoping, Zhu Bingqi. Reinterpretation of the chronological data of palaeo-environmental records in the Badain Jaran Desert and reconstruction of the Holocene climatic changes[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(5): 925-933.]

[18] 王丰年, 李保生, 蒋树萍, 等. 查格勒布鲁剖面记录的OIS3a巴丹吉林沙漠季风气候变化[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 97-102. [Wang Fengnian, Li Baosheng, Jiang Shuping, et al. Monsoonal climate changes from the Chagelebulu section of the Badain Jaran Desert in China during the OIS3a[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 97-102.]

[19] Fan X L, Zhang X Y, Tian M Z. Climate change during the last glacial period on the southeast margin of Badain Jaran Desert, northwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(10): 2379-2388.

[20] 范小露, 张新毅, 田明中. 巴丹吉林沙漠东南缘末次冰期沉积物地球化学特征及气候指示意义[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 409-417. [Fan Xiaolu, Zhang Xinyi, Tian Mingzhong. Geochemical characteristics and paleoclimatic significance of the last gla-

cial sediments in the southeastern margin of Badain Jaran Desert [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 409-417.]

[21] 林培英. 晶体光学与造岩矿物[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 125-168. [Lin Peiying. Crystal optics and rock forming minerals[M]. Beijing: Geological Press, 2005: 125-168.]

[22] 黄继武, 李周. 多晶材料X射线衍射: 实验原理、方法与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 1-117. [Huang Jiwu, Li Zhou. Experimental principles, methods and applications of X-ray diffraction for polycrystalline materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 1-117.]

[23] Zhao H, Li G, Sheng Y, et al. Early-middle Holocene lake-desert evolution in northern Ulan Buh Desert, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 331: 31-38.

[24] 朱大岗, 孟宪刚, 赵希涛, 等. 西藏纳木错晚更新世以来湖面变化和湖相沉积中粘土矿物显示的环境信息[J]. 地质力学学报, 2004, 10(4): 300-309. [Zhu Dagang, Meng Xian'gang, Zhao Xitao, et al. Lake-level change of Nam Co, Tibet, since the late Pleistocene and environment information of clay minerals in lacustrine deposits[J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10(4): 300-309.]

[25] 张雪飞, 郑绵平. 青藏高原扎布耶盐湖SZK01孔粘土矿物X射线粉晶衍射分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 3119-3122. [Zhang Xuefei, Zheng Mianping. X-ray powder diffraction of clay minerals of SZK01 core of Zabuye Lake, Tibetan Plateau[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(11): 3119-3122.]

[26] 贾宛娜. 吉兰泰盐湖34 ka以来的古气候与古环境[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Jia Wanna. Palaeoclimatic and palaeoenvironmental evolution of Jilantai Salt Lake over the past 34 ka[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]

[27] 常宏, 左合君, 王海兵, 等. 黄河乌兰布和沙漠段两岸地表沉积物多重分形特征及其指示意义[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1559-1567. [Chang Hong, Zuo Hejun, Wang Haibing, et al. Multifractal features and their significances of surface sediments along both banks of the Yellow River reach in the Ulanbuh Desert[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1559-1567.]

[28] 张惜伟, 汪季, 高永, 等. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293-299. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Grain size characteristics of topsoil in blowouts on sandy grasslands in Hulun Buir[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 293-299.]

[29] 曹广超, 马海州, 隆浩, 等. 柴达木盆地东部尕海湖DG03孔岩芯粒度特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1073-1077. [Cao Guangchao, Ma Haizhou, Long Hao, et al. Particle size characteristics of deposits from DG03 core of Gahai Lake in east of Qaidam Basin and their environmental significance[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1073-1077.]

[30] 隆浩, 王乃昂, 李育, 等. 毛乌素沙地北缘泊江海子剖面粒度特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 187-193. [Long Hao, Wang Nai'ang, Li Yu, et al. Particle size characteristics of deposits from PJHZ section in northern edge of Mu Us Desert and their environmental significance[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 187-193.]

[31] Zhang X, Zhou A, Zhang C, et al. High-resolution records of climate change in arid eastern Central Asia during MIS 3 (51600-25300 cal a BP) from Wulungu Lake, north-western China[J]. Journal of Quaternary Science, 2016, 31(6): 577-586.

[32] 李开封, 穆桂金, 徐立帅, 等. 塔里木河干流古河道表层沉积物粒度特征及其意义[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 161-164. [Li Kaifeng, Mu Guijin, Xu Lishuai, et al. Grain size characteristics and their significance for surface sediment of paleochannels along main stream of Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 161-164.]

[33] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 343-351. [Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediments in some areas of northern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 343-351.]

[34] 贺振杰, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 哈萨克斯坦巴尔喀什湖沉积物粒度特征及其对区域环境变化的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1317-1327. [He Zhenjie, Ma Long, Abudouwaili Jilili, et al. Grain-size characteristics of lacustrine sediments in Balkhash Lake, Kazakhstan and its response to regional environmental changes[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1317-1327.]

[35] 朱秉启. 中纬度荒漠区河西走廊沙丘地貌的演化特征及其环境指示[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2710-2729. [Zhu Bingqi. The recent evolution of dune landforms and its environmental indications in the mid-latitude desert area (Hexi Corridor)[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2710-2729.]

[36] Wang N A, Ning K, Li Z L, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(8): 1633-1641.

[37] Zhang Z C, Dong Z B, Li C X. Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert[J]. Aeolian Research, 2015(17): 1-13.

[38] 李保生, 高全洲, 阎满存, 等. 150 ka BP以来巴丹吉林沙漠东南区域地层序列的新研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 457-465. [Li Baosheng, Gao Quanzhou, Yan Mancun, et al. A recent study on sedimentary sequence of southeastern Badain Jaran Desert since 150 ka BP[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(4): 457-465.]

[39] 丁仲礼. 中国西部环境演化集成研究[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 95-107. [Ding Zhongli. Integrated study on environmental evolution in western China[M]. Beijing: Meteorological Press, 2010: 95-107.]

[40] Berger A. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements[J]. Quaternary Research, 1978, 9(2): 139-167.

[41] Matsumoto K. Radiocarbon-based circulation age of the world oceans

[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(C9): C09004, doi: 10.1029/2007jc004095.

[42] 王春红, 蒋全荣, 余志豪. 北极III区海冰面积低频变化对北半球冬季大气环流异常的作用[J]. 大气科学, 1997, 21(1): 124–127. [Wang Chunhong, Jiang Quanrong, Yu Zhihao. Effect of the low-frequency variability of the region III Arctic Sea ice cover upon the Northern Hemisphere atmosphere general circulation anomaly in winter[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1997, 21(1): 124–127.]

Mineralogical characteristics and its significance of late Pleistocene sediments in the Badain Jaran Desert

ZHANG Xinyi[1], FAN Xiaolu[1], TIAN Mingzhong[2]

(1. School of History Culture and Tourism, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, Anhui, China;
2. School of the Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: The Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China is an important window to study the aridity and other paleoenvironmental problems in Asia. Taking the Barunbori Tolgoi section in the southeastern margin of the desert as the research object, mineralogical characteristics of sediments, such as structural and compositional maturity, were thoroughly analyzed. Through detailed sample mineralogy under a microscope, semi-quantitative X-ray diffraction (XRD) test, and grain size analysis, the sedimentary environment in this area during the late Pleistocene was reconstructed. Microscopic characteristics of sediments indicate that the mineral debris deposited before 66.8 ka had good sorting, high roundness, and high stable mineral contents, indicating high structural and compositional maturity. After 66.8 ka, the mineral debris exhibited poor sorting, low roundness, and low stable mineral contents, whereas the number of clay minerals increased, indicating lower structural and compositional maturity. The XRD results show that the sediments before 66.8 ka were dominated by felsic minerals with a percentage of 95%–100%. After 66.8 ka, the number of clay minerals gradually increased, indicating that the environment was relatively warm and humid. The appearance of carbonate and evaporite minerals in the later period indicated that the lake water developed toward the direction of salinity. The grain size analysis results show that the sediments before 66.8 ka are dominated by medium sand, with an average content of 65.33%. After 66.8 ka, the sand becomes fine, with the content ranging from 56.32% to 61.51%. The mineral-sorting coefficient corresponding to the standard deviation of grain size data shows that the sorting coefficient of the sediments before 66.8 ka is 0.40–0.67, indicating good sorting. After 66.8 ka, the sediment-sorting coefficients ranged from 0.55 to 1.03, indicating poor sorting. The results show that there was a sudden sedimentary environment change from aeolian sediments to lacustrine sediments around 66.8 ka in the southeastern margin of the Badain Jaran Desert, indicating a significant increase in the lake area and water level. According to the macroscopic geomorphological characteristics and measured data in the field, the elevation of the two salt lakes on the west side of the Barunbori Tolgoi section is approximately 1275 m, whereas the elevation of the platform on the top of the section is 1294 m, which means that the water level rose at least 19 m during this period. The lacustrine platform was gradually deposited on the underlying dunes during the long lake period. The sedimentary environment change may represent a typical East Asian summer monsoon intensification event, which is speculated to be related to the warming of the low-latitude western Pacific Ocean.

Key words: late Pleistocene; mineral characteristics; depositional environment; Badain Jaran Desert